

锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置设计*

林家春^{1,2}, 张凌浩^{1,2}, 石照耀^{1,2}

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124;
2. 北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100124)

摘要:针对高性能锥齿轮在进行磨削加工后齿面磨削烧伤检测问题,研制了锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置,该装置由机械结构、巴克豪森噪声检测模块和检测软件组成。检测装置完全依靠锥齿轮试验机自身的机械系统与电气系统以实现自动检测;其机械结构与被测锥齿轮共用夹具,通过引入柔性轴的设计,可满足多种锥齿轮的检测要求,并可将弧齿锥齿轮的检测过程由六轴联动简化为四轴联动;采用AST公司的RollScan350磁弹仪采集被测锥齿轮的巴克豪森噪声信号,经由上位机检测软件分析处理,对其烧伤情况作出评定。实验结果验证了该检测装置具有较高的重复性,对于齿轮生产中的质量控制有重要意义。

关键词:锥齿轮;磨削烧伤;巴克豪森噪声;自动检测

中图分类号: TH132.41 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Design of automatic detection device for grinding burn of bevel gear tooth surface

Lin Jiachun^{1,2}, Zhang Linghao^{1,2}, Shi Zhaoyao^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing University Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the detection of grinding burn of high performance bevel gear after grinding, the automatic detection device for grinding burn of bevel gear tooth surface is developed. The detection device is composed of mechanical structure, Barkhausen noise detection module and test software. The detection device completely relies on the mechanical system and electrical system of bevel gear tester to realize automatic detection. The mechanical structure shares fixture with gears, by introducing flexible shaft design, which can meet the requirements of a variety of bevel gear detections. And the detection process of spiral bevel gear can be simplified. AST RollScan350 magnetic elastic instrument is employed to collect the Barkhausen noise signal of measured bevel gear. The collected signals are analyzed using detection software run in the host computer. Experimental results indicate the high repeatability of the detection device for quality control in gear production.

Keywords: bevel gear; grinding burn; barkhausen noise; automatic detection

1 引言

锥齿轮传动机构是传递交错轴间运动的关键部件,因其具有重合度高和传动平稳等特点,被广泛应用于汽车、飞机、机床和能源等领域^[1]。对于锥齿轮的检测,通常使用锥齿轮试验机,检测项目包括传动误差、振动噪声

和最佳安装距。随着越来越多的机械设备向高速和重载方向的发展,在高速重载等应用场合下,仅对锥齿轮的几何尺寸进行检测已无法满足实际使用需求。因此,如何得到传动更平稳、振动噪声更低并且使用寿命更长的齿轮是齿轮行业的一个重要研究课题,在锥齿轮试验机中引入锥齿轮传动误差、振动噪声及齿面烧伤等进行综合检测是锥齿轮试验机的发展趋势^[2]。

现有的锥齿轮试验机很少对齿面磨削烧伤进行检测。磨削烧伤是受磨削加工的工艺特性影响,在对经过渗碳淬火处理的锥齿轮进行磨削加工时,砂轮与工件表面间形成的瞬时高温容易在工件表面引发二次淬火即高温回火现象^[3-4]。锥齿轮表面发生磨削烧伤现象会导致其表层材料的硬度及内部残余应力变化,严重影响锥齿轮副的力学性能和使用寿命。此前,企业多用酸洗法和硬度检测法评估锥齿轮齿面磨削烧伤情况,然而这两种方法只能进行抽样检测,且酸洗法会对齿面造成损伤^[5]。近年来市场上出现了基于巴克豪森磁噪声法的磁弹仪,除直接以手持的形式检测齿轮齿面的磨削烧伤情况外,也可通过六轴机械手实现自动检测,但占用空间大且成本高昂^[6]。

针对这一问题,设计了一种基于巴克豪森磁噪声(magnetic Barkhausen noise, MBN)法的锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置(以下简称检测装置),可依靠锥齿轮试验机已有机械和电气结构实现锥齿轮齿面磨削烧伤的自动检测,从而解决锥齿轮试验机无法实现锥齿轮齿面磨削烧伤的在线检测以及人工检测重复率低下的问题,丰富锥齿轮试验机的功能。

2 检测原理

2.1 锥齿轮试验机

目前大多数锥齿轮都是正交安装使用,因此锥齿轮试验机需要 5 个轴的配合运动用以实现所有测量功能^[2]。其中两个旋转运动为带动锥齿轮副啮合滚动的主运动,3 个直线运动为实现齿轮副安装距和偏置距调整的辅运动,5 个运动轴分别为 2 个旋转主轴 A/C 轴和 3 个直线轴 X/Y/Z 轴,如图 1 所示。检测装置通过齿轮夹具夹紧,在锥齿轮试验机四轴联动的基础上实现自动检测。图 1 中检测装置安装在主动夹具上,通过 X/Y/Z/C 四轴联动实现对从动轮的自动检测。同理,更换检测装置的装夹模块后将其安装在从动轮夹具上,通过 X/Y/Z/A 四轴联动实现对主动轮的自动检测。

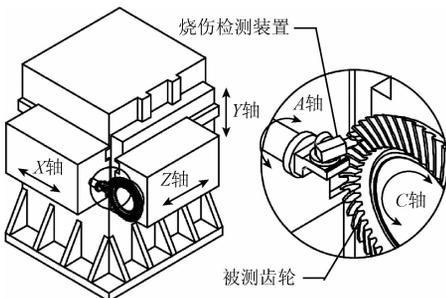


图 1 锥齿轮试验机与检测装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bevel gear tester and detection device

2.2 MBN 法

MBN 信号源于外加交变磁场作用下铁磁性材料内部磁化强度改变的不连续性,铁磁性材料的表面硬度以及内部残余应力的细微变化都会对 MBN 信号水平产生影响^[7-10]。因此,如图 2 所示,可以通过 BP 神经网络或分段统计等算法将 MBN 信号的特征值与被测齿轮的表面硬度和内部残余应力分别建立对应关系,在此基础上对齿面的烧伤程度进行评估,并且通过改变外加交变磁场的参数以实现不同深度范围的检测^[11-13]。

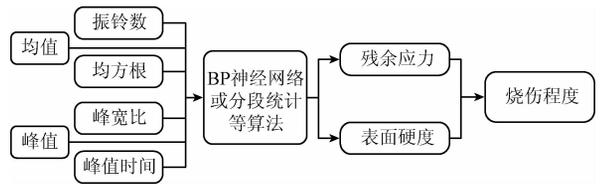


图 2 磨削烧伤程度评定模型

Fig. 2 The evaluation model for grinding burn

MBN 传感器的结构如图 3 所示,通过对 U 形磁轭上的电感线圈施加交变电压,在被测工件表面产生一个交变磁场,由此产生的巴克豪森噪声由感应线圈接收^[14]。其结构特征决定了磁轭、感应线圈与被测工件表面的接触状态的变化会严重影响 U 型磁轭的磁化面积以及感应线圈的接收面积,从而影响 MBN 信号的质量,所以能否在测量过程中能否保证 MBN 传感器的工作面与被测齿面连续、稳定的贴合是获得较高质量的 MBN 信号的关键。

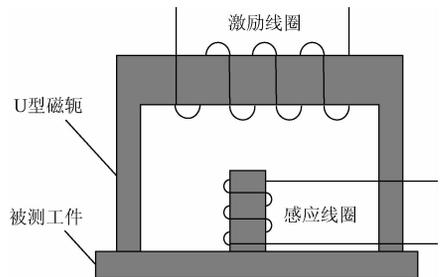


图 3 MBN 传感器结构

Fig. 3 Structure of MBN sensor

2.3 齿面磨削烧伤四轴联动检测原理

锥齿轮试验机的坐标系通常以轴交点为坐标原点,XYZ 坐标轴分别平行于各直线导轨。为便于检测路径的计算,本研究以被测齿轮节锥顶点为坐标原点,以被测齿轮安装轴回转轴线为 Z 轴,X 轴平行于检测机械结构安装轴,如图 4 所示。

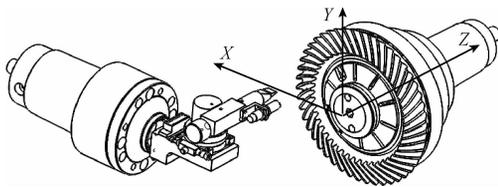


图4 检测坐标系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of detecting coordinate system

在被测齿轮旋转过程中,对于齿线上任意点的切线都会出现平行于 XZ 面的情况,如图5所示,此时该切线也平行于MBN传感器工作面。此时,若能保证MBN传感器可垂直与被测齿轮节锥进入齿槽,以及MBN传感器的工作面垂直于接触点法矢,即可实现在4轴联动的情况下连续稳定的保证MBN传感器与被测齿面良好接触状态。

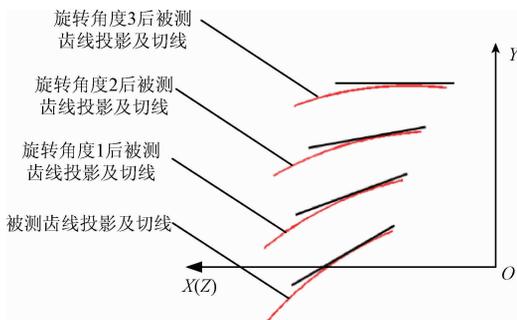


图5 回转过程中齿线投影示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the tooth line projection during the rotation process

为方便计算并保证计算精度,规定MBN传感器工作面与齿面的最佳接触面为:假设被测齿线上的接触点为 O ,则经过点 O 且与该点法矢垂直的平面即为最佳接触平面。则MBN传感器与被测齿面的最佳接触状态为MBN传感器沿齿型方向进入齿槽,工作面与最佳接触平面重合且与齿面相切与齿线上的一点,如图6所示。

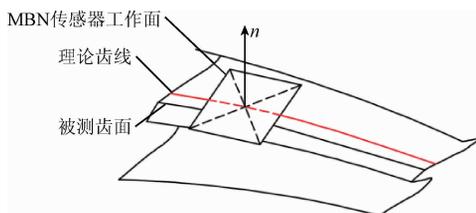


图6 MBN传感器与齿面最佳接触状态

Fig. 6 The optimal contact state of MBN sensor and tooth surface

假设投影面1通过检测坐标系原点且与被测齿轮节锥母线重合,如图7所示。

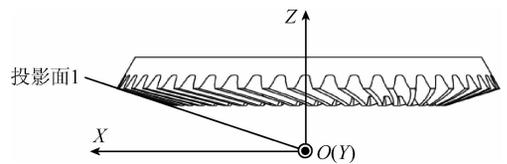


图7 投影面1示意图

Fig. 7 Schematic diagram of projection plane 1

2.4 磨削烧伤检测装置构成

2.4.1 检测装置总体方案

检测装置由MBN信号检测模块、机械结构和检测软件组成。机械结构配合锥齿轮试验机已有机械及电气系统实现检测各种类型锥齿轮所需运动,在此基础上MBN信号检测模块采集被测齿轮齿面的MBN信号并通过检测软件对其磨削烧伤程度做出评定。检测装置总体结构如图8所示。工控机向下控制运动控制器和磁弹仪并接收运动控制器的反馈。运动控制器通过控制各电机驱动执行机构实现所需运动,包括检测装置机械结构自定位、齿槽找正以及自动检测。自动检测过程中,磁弹仪采集被测齿轮齿面的MBN信号通过数据采集卡上传工控机处理分析。

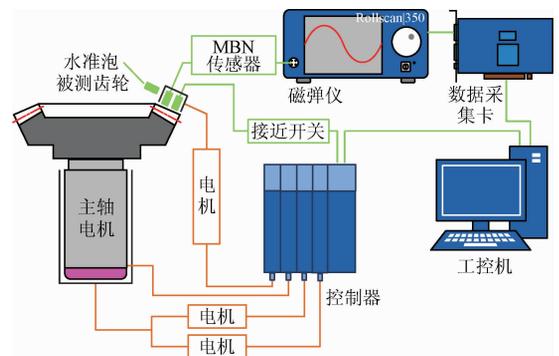


图8 检测装置总体结构

Fig. 8 Structure of detection device

2.4.2 MBN信号检测模块设计

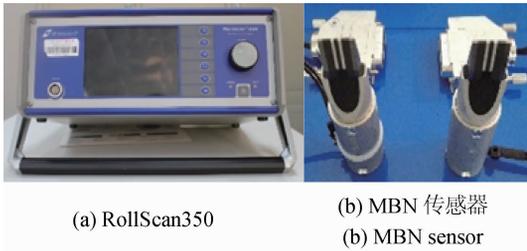
通常情况下,锥齿轮试验机的工作环境都较为恶劣,为保证检测装置具有高可靠性和高抗干扰性,本研究选用芬兰Stresstech公司的Rollscan350磁弹仪,其主要参数如表1所示。如图9所示,MBN传感器的测头有平面和弧面两种,分别可用于检测直齿锥齿轮和弧齿锥齿轮(准双曲面锥齿轮)。MBN信号的频率分布与铁磁性材料的性质有很大关系^[15],其频率范围通常在 $1 \sim 500$ kHz。常用齿轮材料对应的MBN信号频率主要集中在15 kHz左右,其中45号钢和Q235钢对应MBN信号的中心频率分别为40和20 kHz,根据香农采样定理可知数据采集卡的单通道的采样频率至少要100 kHz。本研究选用的PCI-

4472 是一款从事高精度检测的 8 通道动态信号采集卡。其模拟量检测范围为 ±10 V,分辨率为 24 位,最高采样速率 102.4 kHz。完全可以满足 MBN 信号检测模块的需要。

表 1 Rollscan350 主要参数

Table 1 The main parameters of RollScan350

激励方式	激励电压/V	激励频率/Hz	滤波范围/kHz
三角波	0 ~ 16	10 ~ 1 000	10 ~ 70
正弦波			70 ~ 200
			200 ~ 450



(a) RollScan350

(b) MBN 传感器
(b) MBN sensor

图 9 RollScan350 和 MBN 传感器

Fig. 9 RollScan350 and MBN sensor

2.4.3 机械结构构成

检测装置机械结构如图 10 所示,常见锥齿轮试验机主体由 3 个方向的直线导轨和 2 个回转主轴组成,该机械结构通过装夹底座与齿轮夹具配合安装在主轴上,被测齿轮安装在另一侧主轴并随主轴一起转动,配合三方向的导轨实现四轴联动。旋转模块用以保证 MBN 传感器垂直于被测齿轮节锥,以提高检测精度和重复性。接近开关用以找正齿槽位置,水准泡用以实现磨削烧伤检测部分机械结构自定位。柔性轴模块用以弥补因联动轴数量不足引起 MBN 传感器与被测齿面无法有效贴合。机械结构主要尺寸如图 11 所示。

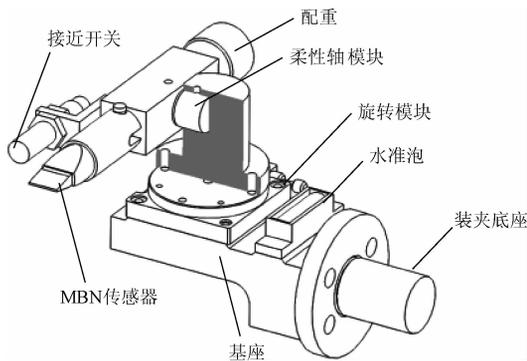


图 10 检测装置机械结构

Fig. 10 Mechanical structure of detection device

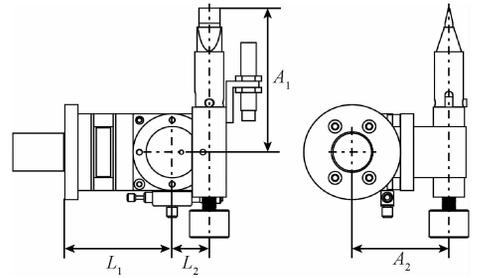


图 11 各主要尺寸示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the main dimensions

2.5 各轴运动参数计算

2.5.1 被测锥齿轮模型建立

为完整评估被测齿面的磨削烧伤程度,MBN 传感器须贴合在齿面上并沿齿线扫描检测,并在检测过程中始终保持良好的贴合状态,故在检测前需要精确计算出被测齿轮齿线方程以及齿面方程。以弧齿锥齿轮为例,其齿线方程 $L = [X, Y, Z]$ 可表示为^[16]:

$$\begin{cases} X = \frac{\theta}{2\pi} \sqrt{x^2 + y^2} \times \cos\left(\frac{\theta}{2\pi} \tan^{-1} \frac{y}{x}\right) \\ Y = \frac{\theta}{2\pi} \sqrt{x^2 + y^2} \times \sin\left(\frac{\theta}{2\pi} \tan^{-1} \frac{y}{x}\right) \\ Z = \sqrt{x^2 + y^2} \times \sqrt{1 - \left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = (S^2 + R_m^2 - r_c^2) / 2R_m + r_c \cos t \\ y = r_c \cos(90^\circ - \beta) - r_c \sin t \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{R_m^2 + r_c^2 - 2R_m r_c \cos(90^\circ - \beta)} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\pi d}{R} \quad (4)$$

式中: R_m 为中点锥距, R 为大端锥距, d 为分度圆半径, r_c 为铣刀盘半径, β 为中点螺旋角, t 为变量。

基于球面渐开线形成原理,弧齿锥齿轮的球面渐开线齿面方程 $S = [X_s, Y_s, Z_s]$ 可表示为^[17-18]:

$$\begin{cases} X_s = r_s \sin \theta_s \cos \varphi_s \\ Y_s = r_s \sin \theta_s \sin \varphi_s \\ Z_s = r_s \cos \theta_s \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} r_s = R_p \\ \theta_s = \delta_f + t \cdot (\delta_a - \delta_f) \\ \varphi_s = \frac{\cos^{-1}(\cos \theta_s / \cos \delta_b)}{\sin \delta_b} - \cos\left(\frac{\cos \delta_b}{\cos \theta_s}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_p 为该点锥距,即球面渐开线圆的半径, t 为变量, δ_a 和 δ_f 分别表示顶锥角和根锥角。

2.5.2 检测路径规划

检测路径规划作为提高检测装置工作效率的重要一环,其目标就是要生成一个最优的无碰撞检测路径以使检测在最短的时间内完成^[19]。

由式(2)和(5)可知被测齿轮的理论齿线和齿面方程分别为 $L = [X, Y, Z]$ 和 $S = [X_s, Y_s, Z_s]$ 。则该齿线在投影面 1 上投影可表示为 $L_t = [X_t, Y_t, Z_t]$, 其中:

$$\begin{cases} X_t = \sqrt{X^2 + Z^2} \times \cos\left(\delta - \tan^{-1} \frac{x}{z}\right) \times \cos\delta \\ Y_t = Y_s \\ Z_t = \sqrt{X^2 + Z^2} \times \sin\left(\delta - \tan^{-1} \frac{x}{z}\right) \times \cos\delta \end{cases} \quad (8)$$

对于理论齿线上的假定接触点 (x, y, z) , 其在投影面 1 上的投影可表示为 (x_t, y_t, z_t) , 则过该点切线与水平面夹角为:

$$\alpha_q = \tan^{-1}\left(\frac{y_t}{\sqrt{x_t^2 + z_t^2}}\right) \quad (9)$$

可得将被测齿轮绕 Z 轴旋转 α_q 角度后被测齿线 L 与水平面切于假定接触点, 此时齿线和齿面方程可通过坐标转换求得:

$$\begin{cases} L_1 = L \times M_1 \\ S_1 = S \times M_1 \end{cases} \quad (10)$$

其中坐标转换矩阵为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha_q & \sin\alpha_q & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_q & \cos\alpha_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

此时假定接触点坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 其法矢为 (a, b, c) , 可得柔性轴旋转角度为:

$$\alpha_r = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2} \left(\cos\delta - \tan^{-1} \frac{c}{a}\right)} \quad (12)$$

由此可得检测该点时各轴运动参数为:

$$\begin{cases} S_x = x_1 + A_1 \sin\alpha_s \cos\alpha_r + L_2 \cos\alpha_s + L_1 \\ S_y = y_1 - A_1 \sin\alpha_s - A_2 \\ S_z = -z_1 + A_1 \cos\alpha_s \cos\alpha_r - L_2 \sin\alpha_s + \Delta_z \\ S_c = \alpha_q \end{cases} \quad (13)$$

式中: α_s 为旋转模块旋转角度, S_x, S_y, S_z 和 S_c 分别为检测假定接触点 (x, y, z) 时各直线轴和被测齿轮安装轴的运动参数, Δ_z 为被测齿轮节锥顶点到安装基面的距离。

3 仿真与检测实例分析

3.1 实验环境

实验在本实验室开发的齿轮传动形性测试仪上进行, 如图 12 所示。锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置实物如图 13 所示, 其旋转模块和柔性轴模块的功能分别通过手动旋转平台和十字扭簧实现。

齿轮传动形性测试仪的基本参数如表 2 所示, 试件参数如表 3 所示。



图 12 齿轮传动形性测试仪

Fig. 12 Gear transmission form and performance tester

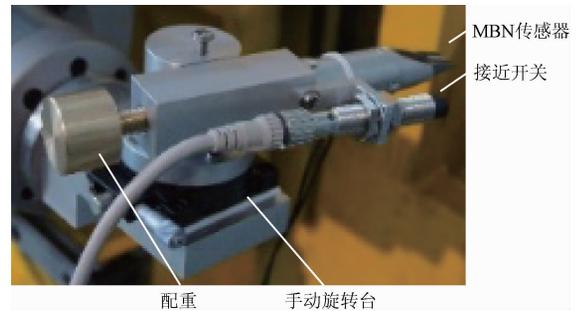


图 13 磨削烧伤自动检测装置实物

Fig. 13 Automatic detection device for grinding burn

表 2 齿轮传动形性测试仪基本参数

Table 2 The basic parameters of gear geometry and performance tester

结构尺寸参数	数值/mm
X 轴行程	200
Y 轴行程	160
Z 轴行程	200
主动轮轮夹具尺寸	φ30
从动轮夹具尺寸	φ105

表 3 试件参数

Table 3 The parameters of specimen

齿轮参数	主动轮	从动轮
齿数	8	41
端面模数	-	4.161 mm
偏移距		30 mm
平均压力角		19°
分度圆直径	-	170.6 mm
中点螺旋角	46°25'	22°39'
螺旋方向	左	右

3.2 有限元仿真分析

为减轻重量,磨削烧伤检测系统的机械结构除与齿轮夹具配合的装夹底座采用45号钢外其他零件均采用2A11硬铝。在机械结构上大量采用硬铝材料虽然会大幅降低机械结构的整体重量,但硬铝材料本身刚度不足易导致结构形变是影响整个检测装置可靠性的一个重要因素。除此之外,由于手动旋转台台面的承载能力仅为3 kg,在极限工作状态下手动旋转台面是否超过该值同样会对检测装置的可靠性造成影响。

极限工作状态下,烧伤检测系统中的十字扭簧旋转角度为 20° ,此时MBN传感器工作面受力 F_b 大小为:

$$F_b = \frac{K\alpha_{\max}}{A_1} = \frac{0.045 \times 20}{0.074} \approx 12.2 \text{ N} \quad (14)$$

式中: K 为十字扭簧的扭转刚度, α_{\max} 为十字扭簧的最大旋转角度, A_1 为机械结构尺寸

使用ANSYS软件对烧伤检测系统的机械结构进行形变分析和等效应力分析,结果如图14和15所示。根据形变分析结果,结构整体形变最大值为 $6 \mu\text{m}$,出现在MBN传感器端部。手动旋转台面最大应力值为 $5\,629.2 \text{ Pa}$,其台面面积为 $0.002\,826 \text{ mm}^2$,可得出在极限工作条件下手动旋转台面承载远小于3 kg。可见,本结构的刚度完全满足要求。

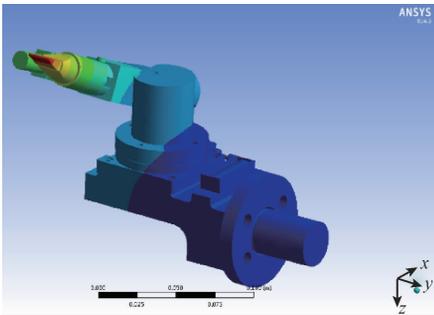


图14 形变分析结果

Fig. 14 Results of deformation analysis

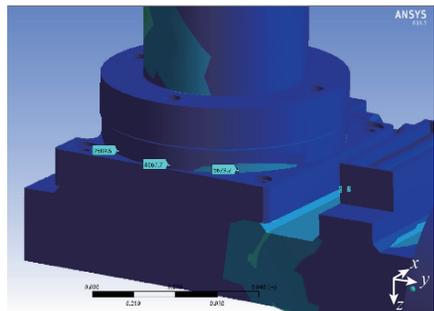
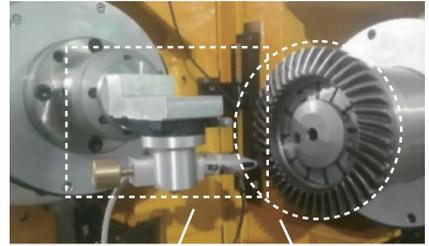


图15 等效应力分析结果

Fig. 15 Results of equivalent stress analysis

3.3 检测实例分析

在齿轮传动形性测试仪上对从动轮同一齿面重复自动检测18次,如图16所示。



磨削烧伤检测装置 被测齿轮

图16 从动轮检测

Fig. 16 Detection of driven wheel

取信号的均值、均方根和峰值,结果如表4所示。通过对检测结果进行分析,信号的均值、均方根和峰值的最大相对误差分别为2.94%、2.53%和1.91%,说明本装置具有较高的重复性。

表4 重复测量结果

Table 4 Results of repeated measurement

序号	均值/ mV	均方根	峰值/ mV	序号	均值/ mV	均方根	峰值/ mV
1	1.229	0.554	4.829	10	1.247	0.566	4.821
2	1.249	0.551	4.835	11	1.292	0.557	4.800
3	1.255	0.570	4.668	12	1.287	0.576	4.694
4	1.283	0.550	4.665	13	1.263	0.577	4.780
5	1.259	0.550	4.698	14	1.237	0.556	4.818
6	1.264	0.574	4.676	15	1.262	0.564	4.728
7	1.226	0.555	4.727	16	1.240	0.557	4.800
8	1.233	0.577	4.673	17	1.247	0.558	4.822
9	1.240	0.558	4.710	18	1.271	0.558	4.669

4 结 论

本研究针对现有锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测仪器所存在的不足,研制了基于MBN原理的可用于锥齿轮试验机的锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置。本装置充分利用锥齿轮试验机已有直线运动和回转运动,实现自动检测,结构简单紧凑,解决锥齿轮试验机无法实现锥齿轮齿面磨削烧伤以及人工检测重复率低下问题,并有效降低了锥齿轮齿面磨削烧伤的检测成本,可以广泛应用于各种锥齿轮试验机中。

参考文献

- [1] 谢华锟, 王志, 石照耀, 等. 锥齿轮测量技术的最新进展[J]. 工具技术, 2003, 37(10):48-51.
XIE H K, WANG ZH, SHI ZH Y, et al. Development on technology of bevel gear measurement [J]. Tool Engineering, 2003, 37(10):48-51.
- [2] 杨大谦, 林家春, 石照耀. 锥齿轮传动形性测试仪的设计[J]. 机电工程, 2016, 33(4):401-405.
YANG D Q, LIN J CH, SHI ZH Y. Design of bevel gear geometry and performance tester [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(4):401-405.
- [3] MA N, XU W, WANG X, et al. Mathematical modeling for finishing tooth surfaces of spiral bevel gears using pulse electrochemical dissolution [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9):979-986.
- [4] 吕红明, 王琪, 范能胜. 汽车渗碳淬火齿轮磨削烧伤的研究[J]. 机械传动, 2009, 33(3):108-110.
LV H M, WANG Q, FAN N SH. Study on grinding burns of case-hardened gear for automobile [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2009, 33(3):108-110.
- [5] 朱正德. 磨削烧伤检测及其评定方法[J]. 汽车工艺与材料, 2013, (8):37-39.
ZHU ZH D. Detection and evaluation of grinding burn [J]. Automobile Technology & Material, 2013(8):37-39.
- [6] 林家春, 黄绍宇. 齿轮磨削烧伤自动检测系统的设计与实现[J]. 机械传动, 2015(11):145-149.
LIN J CH, HUANG SH Y. Design and implementation of automatic detection system of gear grinding burn [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015(11):145-149.
- [7] 傅洁, 殷华宇, 陈娟, 等. 基于巴克豪森效应的钢轨应力检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5):403-408.
FU J, YIN H Y, CHEN J, et al. Design of rail stress detection system based on Barkhausen effect [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(5):403-408.
- [8] SORSA A, LEIVISKI K, SANTA-AHO S, et al. Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the barkhausen noise measurement [J]. NDT & E International, 2011, 46(1):100-106.
- [9] STUPAKOV A, PEREVERTOV O, ZABLOTSKII V. Dynamical properties of magnetic barkhausen noise in a soft microalloyed steel [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(1):1-4.
- [10] VAIDHIANATHASAMY M, SHAW B A, BENNETT W, et al. Assessment of grinding damage on gear teeth using magnetic barkhausen noise measurements [J]. 12th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, 2008, 31(6):90-97.
- [11] 曹先庆, 朱建光, 唐任远. 基于改进算法 BP 神经网络的软测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(增刊1):185-186.
CAO X Q, ZHU J G, TANG R Y. Soft-sensing technology based on improved BP-neural-network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(Suppl. 1):185-186.
- [12] SANTA-AHO S, SORSA A, HAKANEN M, et al. Barkhausen noise-magnetizing voltage sweep measurement in evaluation of residual stress in hardened components [J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(8):21-35.
- [13] 舒迪, 祁欣. 神经网络在无缝线路应力检测中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6):515-520.
SHU D, QI X. Research on artificial neural networks in continuous welded rail stress test [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(6):515-520.
- [14] 庞娜, 程德福, 王言章, 等. 时间差型磁通门敏感单元巴克豪森噪声处理研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11):2594-2601.
PANG N, CHENG D F, WANG Y ZH, et al. Research on sensitive unit barkhausen noise processing of residence times difference fluxgate [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11):2594-2601.
- [15] 王平, 朱晓雪, 田贵云, 等. 基于 DSP 的巴克豪森便携式应力检测系统的开发[J]. 无损检测, 2012, 34(11):1-4.
WANG P, ZHU X X, TIAN G Y, et al. The development of barkhausen portable stress testing system based on the DSP [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(11):1-4.
- [16] 谷计划, 段建中. 格利森弧齿锥齿轮啮合传动节线的数学原理[J]. 工程设计学报, 2010, 17(1):71-75.
GU J H, DUAN J ZH. Mathematic principle of pitch line of gleason spiral bevel gear pair in driving [J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(1):71-75.
- [17] 丁撼, 阿达依·谢尔亚孜. 螺旋锥齿轮球面渐开线齿面形成原理及推论[J]. 图学学报, 2013, 34(6):42-47.
DING H, ADAYI X, ADAYI X. Forming principle and

inferences of spherical involute tooth surface for spiral bevel gears [J]. *Journal of Graphics*, 2013, 34(6): 42-47.

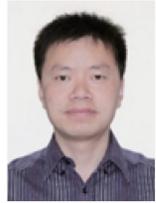
- [18] 由成林. 弧齿锥齿轮齿面离散化建模及接触分析[D]. 浙江:浙江大学, 2011.

YOU CH L. Modeling and tooth contact analysis for spiral bevel gear based on discrete tooth surface [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011.

- [19] 赵韩, 刘达新, 董玉德, 等. 基于CAD的三坐标测量机检测规划系统的开发[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(9): 1846-1853.

ZHAO H, LIU D X, DONG Y D, et al. Development of CAD-based inspection planning system for CMM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(9): 1846-1853.

作者简介



林家春, 分别在1978年和2006年于中国农业大学获得学士学位和博士学位, 现为北京工业大学副教授, 主要研究方向为精密测试技术与仪器。

E-mail: linjc@bjut.edu.cn

Lin Jiachun received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China Agricultural University in 1978 and 2006, respectively. Now he is an associate professor in Beijing University of Technology. His main research interest is precision measurement technology and instruments.



张凌浩, 2013年于北华航天工业学院获得学士学位, 现为北京工业大学在读硕士研究生, 主要研究方向为精密测试技术与仪器。
E-mail: zhanglinghao@emails.bjut.edu.cn

Zhang Linghao received his B. Sc. degree in 2013 from North China Institute of Aerospace Engineering, and he is now a graduate student in Beijing University of Technology. His main research interest is precision measurement technology and instruments.



石照耀, 1984年于合肥工业大学获得学士学位, 1988年于陕西机械学院获得硕士学位, 2001年于合肥工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学博士生导师、教育部长江学者特聘教授, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

Shi Zhaoyao received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, and M. Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988, and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. Currently, he is a professor and Ph. D. supervisor in Beijing University of Technology, and a “Yangtze River Scholar” special professor awarded by the Ministry of Education. His main research interest is precision measurement technology and instruments.